

<https://helda.helsinki.fi>

Metsäojitetun suon ilmastovaikutukset

Ojanen, Paavo

2020

Ojanen , P & Minkkinen , K 2020 , ' Metsäojitetun suon ilmastovaikutukset ' , Suo ,
Vuosikerta. 71 , Nro 2 , Sivut 189-198 . <
<http://www.suoseura.fi/ojitettujen-soiden-kestava-kaytto/metsaojitetun-suon-ilmastovaikutukset/>
>

<http://hdl.handle.net/10138/332567>

cc_by_sa
publishedVersion

Downloaded from Helda, University of Helsinki institutional repository.

This is an electronic reprint of the original article.

This reprint may differ from the original in pagination and typographic detail.

Please cite the original version.

➤ Metsäojitetun suon ilmastovaikutukset

Paavo Ojanen & Kari Minkkinen

*Paavo Ojanen, Helsingin yliopisto, paavo.ojanen@helsinki.fi;
Kari Minkkinen, Helsingin yliopisto, kari.minkkinen@helsinki.fi*

Johdanto

Metsäojitettu suo on ilmastovaikutuksiltaan monella tapaa erilainen kuin maatalouteen tai turpeennostoon ojitettu suo. Muissa käyttömuodoissa turpeen nopea hävikki johtaa suuriin hiilidioksidi- ja typpioksiduulipäästöihin (Ojanen ym. 2020). Metsäojitetulla suolla turpeen hävikki on selvästi hitaampaa kuin pelloilla tai turpeennostoalueilla. Metsäojitetuilla soilla myös kasvavan puuston hiilinielu voi olla yhtä suuri tai suurempi kuin turpeen hiilen hävikki. Puuston hiilivaraston muutokset eivät myöskään ole samankaltaisia vuodesta toiseen, vaan vaihtelevat voimakkaasti puuston kasvusta ja hakkuista riippuen.

Metsänhoitotoimenpiteitä ja hakkuita tehdään vain kymmenien vuosien välein, joten niiden vaikutus ei ole mukana maaperän vuotuisten päästöjen arvioissa, vaan ne täytyy käsitellä erikseen. Maataloudessa ja turpeennostossa samat toimenpiteet toistuvat vuosittain, joten niiden vaikutukset sisältyvät yleensä maaperän päästöarvioihin. Oman lisänsä metsäojitetun suon ilmastovaikutusten arviointiin tuo se, että oijen lisäksi puuston maaperästä haihduttamalla

ja sateesta latvuksiinsa pidättämällä vedellä on merkittävä vaikutus pohjavedenpinnan syvyyteen ja sitä kautta turpeen hävikkiin. Puusto vaikuttaa myös suon säteily- ja energiataseeseen ja on merkittävä haihtuvien orgaanisten aineiden lähde.

Metsäojitetun suon maaperän päästöt

Ojituksen vaikutus

Metsäojitetun suon maaperän kasvihuonekaasupäästöt¹ kasvuvaiheessa olevassa metsässä tunnetaan hyvin (Ojanen ym. 2020). Niihin vaikuttaa voimakkaasti kaksi asiaa: kasvupaikan ravinteikkaus ja kasvukauden keskimääräinen vedenpinnan syvyys. Ravinteikkaimmilla kasvupaikoilla (ruoho- ja mustikkaturvekankaat) on havaittu merkittävää turpeen hävikkiä (Minkkinen & Laine 1998) ja siitä seuraavia hiilidioksidi- ja typpioksiduulipäästöjä (Ojanen & Minkkinen 2019, Minkkinen ym. 2020). Näitä karummilla kasvupaikoilla (puolukka-, varpu- ja jäkäläturvekankaat) turpeen hävikki on vähäisempää: maaperä voi maltillisella kuivatuksella olla jopa hiilidioksidipäästötön ja typpioksiduulipäästö

¹ *Päästöllä* tarkoitetaan suon ja ilmakehän välistä vuotuista kaasunvaihtoa eli suon vuotuista kaasutasetta. Suo voi vuoden mittaan toimia sekä kasvihuonekaasujen nieluna että lähteenä, mutta ilmaston kannalta merkityksellistä on, kuinka paljon kaasuja siirtyy vuoden aikana suosta ilmakehään (lähde) tai ilmakehästä suohon (nielu). Näin määriteltynä päästöllä on sama merkitys kuin yleensäkin kasvihuonekaasuista puhuttaessa.

on ojittamattoman suon tasolla (Ojanen & Minkkinen 2019, Minkkinen ym. 2020). Sekä ravinteikkailta että karuilla kasvupaikoilla hiilidioksidipäästö riippuu ainakin 60 cm syvyyteen asti suoraviivaisesti vedenpinnan syvyydestä (Ojanen & Minkkinen 2019): Mitä syvemmällä vedenpinta on, sitä suurempi on päästö rehevillä kasvupaikoilla. Karutkin kasvupaikat muuttuvat päästölähteiksi, kun vedenpinta laskee tarpeeksi syvälle (yli 40 cm syvyydelle). Rehevillä kasvupaikoilla myös typpioksiduulipäästö on sitä suurempi, mitä syvemmällä vedenpinta on (Minkkinen ym. 2020).

Metsäojitetulta suolta ei tule merkittävää metaanipäästöä, kun vedenpinnan taso on vähintään 20 cm syvyydessä eikä suokasvillisuutta esiinny (Ojanen ym. 2010, Minkkinen ym. 2018, ks. Ojanen ym. 2020). Tällainen tilanne on sellaisilla hyvin metsää kasvavilla ruoho-, mustikka- ja puolukkaturvekankailla, joilla ojitus on teknisesti onnistunut (ovat luokituksessa yleensä turvekangasasteella). Ojien väliset sarat toimivat pieninä metaanin nieluina, mikä keskimäärin kompensoi ojista tulevan metaanipäästön. Tällaisilla paikoilla vedenpinnan laskeminen entistä syvemmälle ei enää vaikuta metaanipäästöön. Teknisesti huonosti onnistuneilla ojituksilla vedenpinta voi olla korkealla ja suokasvillisuutta voi esiintyä edellä mainituilla kasvupaikoilla (jääneet ojikko- tai muuttuma-asteelle). Tällöin metaanipäästö on kuivimpien luonnontilaisten soiden tasolla (Ojanen ym. 2010). Karuimmilla kasvupaikoilla (varpu- ja erityisesti jäkäläturvekankaat) teknisesti onnistunut ojitukseen ei aina kuivata suota tehokkaasti veden hitaan liikkeen ja puuston vähäisen haihdutuksen takia, jolloin päästö on kuivimpien luonnontilaisten soiden tasolla (Ojanen ym. 2010, Heikkinen ym. 2016).

Metsitettyjen turvemaan peltojen maaperän päästöt ovat isommat kuin metsäojitetujen soiden (ks. Ojituksen vaikutus maaperän kasvihuonekaasupäästöihin, s. 173). Maanviljelyn aikana tehokkaasti kuivatettu, lannoitettu ja kalkittu turvema ei muutu saman tien metsäojitetun suon kaltaiseksi puita istuttamalla. Maaperän typpioksiduulipäästöjen on havaittu olevan lähes yhtä suuret kuin peltojen päästöt vielä 20–30 vuotta metsityksen jälkeenkin (Maljanen ym. 2001, 2012, Pihlatie ym. 2004, Mäkiranta ym.

2007). Maaperän hiilidioksidipäästöistä on vain vähän tietoa, mutta turpeen hajoaminen voi olla voimakasta metsityksen jälkeenkin (Mäkiranta ym. 2007, 2008), ja maaperä voi olla suuri hiilidioksidin lähde (Lohila ym. 2007), samalla tasolla suuripäästöisimpien ravinteikkaiden metsäojitetujen soiden kanssa.

Suomen ojitetuista metsistä 1.3 miljoonaa hehtaaria luokitellaan ojitetuiksi kankaiksi. Näistä arviolta puolet (Korhonen ym. 2020) on ollut alunperin soistumia tai ohutturpeisia soita, pääosin korpia. Näiden ojitusalueiden maaperän kasvihuonekaasupäästöistä ei ole tutkimustietoa. Koska ojitetujen soiden maaperän päästöt ovat seurausta turpeen hävikissä vapautuvasta hiilestä ja tyypestä, alun perin turpeettomien tai turpeensa jo menettäneiden ojitusalueiden maaperä ei liene merkittävä päästölähde.

Metsätaloustoimenpiteiden vaikutus

Useimpien metsätalouden toimenpiteiden vaikutuksia maaperän päästöihin on tutkittu melko niukasti eikä täsmällisiä lukuarvoja voida antaa.

Avohakkuu ja metsänuudistaminen aiheuttavat päästöjä maaperästä (Huttunen ym. 2003, Saari ym. 2009, Mäkiranta ym. 2010, 2012, Pearson ym. 2012, Ojanen ym. 2017, Korkiakoski ym. 2019): Turpeen hajotus vähenee vedenpinnan nousun takia, mutta toisaalta puuston ja aluskasvillisuuden yhteytys ja kariketuotos lähes loppuvat, joten hiilidioksidipäästö kasvaa (Mäkiranta ym. 2010). Turvemaiden uudistamisessa tyypillinen maanmuokkaus mätästäväällä ei välttämättä lisää hiilidioksidipäästöjä, mikä johtunee siitä että syvemmältä pintaan nostettu, pitkälle hajonnut pohjaturve hajoaa hapellisissa oloissa hitaammin kuin pintaturve, joka erityisesti kääntömätästyksessä jää vedenpinnan alle (Pearson ym. 2012). Typpioksiduulipäästö lisääntyy sekä maaperästä että hakkuutähdekasoista (Mäkiranta ym. 2012, Korkiakoski ym. 2019). Tämä johtunee siitä, että hakkuun jälkeen tyypeä vapautuu runsaasti hakkuutähteistä ja kuolleesta pintakasvillisuudesta mutta typen tarve on vähäistä puuston ja usein pintakasvillisuudenkin puuttuessa. Jos vedenpinta hakkuualalla nousee korkealle tai maanmuokkaus synnyttää märkiä pintoja, metaanipäästö kasvaa hieman.

Harvennushakkuiden vaikutuksista on niukasti tutkimustietoa (Korkiakoski ym. 2020), mutta vaikutukset ovat todennäköisesti samansuuntaisia mutta vähäisiä verrattuna avohakkuihin: Typen tarjonta ja kysyntä ovat paremmin tasapainossa, joten typpioksiduulipäästöä voisi syntyä lähinnä hakkuutähdekasoista. Vedenpinta nousee yleensä vain vähän (5–10 cm: Mäkiranta 2003, Lankinen-Timonen 2019, Korkiakoski ym. 2020), joten metaanipäästö jäänee vähäiseksi. Pieni vedenpinnan nousu vähentänee turpeen hajoamista (Lankinen-Timonen 2019), joten kariketuotoksen pysyessä kutakuinkin ennallaan maaperän hiilidioksidipäästö voi pienentyä.

Myös kunnostusojituksen vaikutuksista päästöihin on vain vähän tutkimuksia (Lankinen-Timonen 2019), mutta vaikutuksia voidaan arvioida vedenpinnan muutosten perusteella. Kunnostusojituksen seurauksena vedenpinta laskee ja siten maaperän hiilidioksidipäästö kasvaa (Lankinen-Timonen 2019, Ojanen & Minkkinen 2019). Vaikutus on suurempi rehevillä kuin karuilla kasvupaikoilla. Voidaan karkeasti arvioida (Ojanen & Minkkinen 2019), että kunnostusojitus aiheuttaa rehevillä kasvupaikoilla 6,3 t/ha ja karuilla kasvupaikoilla 3,2 t/ha hiilidioksidipäästön, kun oletetaan, että kunnostusojitus laskee vedenpintaa 5 cm ja vaikutus häviää 20 vuodessa (Ahti & Päivänen 1997, Sarkkola ym. 2010). Myös typpioksiduulipäästö voi lisääntyä rehevillä kasvupaikoilla, mutta karuilla kasvupaikoilla ei ole havaittu merkittävää typpioksiduulipäästön riippuvuutta vedenpinnan syvyydestä (Minkkinen ym. 2020).

Vaikka kunnostusojitus laskee vedenpintaa, sillä ei yleensä ole merkittävää vaikutusta metaanipäästöön. Harva ojitusalue on ennen kunnostusojitustakaan niin märkä, että märkyys aiheuttaisi huomattavaa metaanipäästöä (Ojanen ym. 2010), joka voisi kunnostusojituksen seurauksena pienentyä.

Erityisesti rehevillä kasvupaikoilla kunnostusojitus aiheuttaa pitkällä aikavälillä kasvihuonekaasupäästöjä. Se ylläpitää kuivatusta ja sitä kautta turpeen hävikkiä ja siitä seuraavia hiilidioksi- ja typpioksiduulipäästöjä. Toistuvien kunnostusojitusten ja turpeen hävikin seurauksena suon pinta ja ojan pohja painuvat vähitellen syvemmälle ja turve häviää vuosikymmenten ja -satojen kuluessa.

Lannoituksen (puutuhka tai fosfori-kalium-lannoite) vaikutuksia maaperän kasvihuonekaasupäästöihin on tutkittu melko paljon. Tutkimukset ovat kuitenkin kohdistuneet lähinnä metsänkasvatuskelvottomiksi määritellyille soille, jotka ovat joko hyvin karuja soita tai voimakkaasti ravinne-epätasapainoisia runsastyyppisiä soita (Moilanen ym. 2002, 2012, Maljanen ym. 2006, 2014, Ernfors ym. 2010, Klemedtsson ym. 2010, Rütting ym. 2014, Saarsalmi ym. 2014, Ojanen ym. 2019). Lannoitusta seuraavien vuosien aikana ei ole havaittu vaikutuksia maaperän hiilidioksi-, metaani- tai typpioksiduulipäästöihin. Merkittäviä vaikutuksia typpioksiduuli- ja metaanipäästöihin ei ole havaittu vuosikymmenien kuluessa. Todennäköisesti näillä suometssissa käytetyillä typettömillä lannoitteilla lannoitus ei myöskään tyypillisillä Mtkg II- ja Ptkg II-tyypin lannoituskohteilla aiheuta typpioksiduuli- ja metaanipäästöjä.

Maaperän hiilidioksidipäästö kuitenkin kasvaa vuosikymmenien mittaan (Maljanen ym. 2006, 2014, Moilanen ym. 2012, Ojanen ym. 2019). Tämä näyttäisi johtuvan siitä, että puuston varttuessa vedenpinta laskee entisestään ja samalla turpeen hävikki kiihtyy (Ojanen ym. 2019, Ojanen & Minkkinen 2019). Koska tutkimukset ovat kohdistuneet alkujaan vähäpuustoisille soille, puuston voimakkaalla lisääntymisellä on ollut näissä tutkimuksissa merkittävä suota kuivattava vaikutus. Talousmetsissä tyypillisiä lannoituskohteita ovat kuitenkin jo ennen lannoitusta runsaspuustoiset Mtkg II- ja Ptkg II-tyypin kasvupaikat. Niillä lannoituksen turpeen hävikkiä kiihdyttävä vaikutus voi olla pienempi, jos puustomuutokset ja niistä seuraava vedenpinnan lasku jäävät vähäisemmiksi. Turpeen hävikki voi kuitenkin kiihtyä, vaikka lannoituksesta ei seuraisi merkittävää vedenpinnan laskua. Lannoitus parantaa ravinteiden saatavuutta, mikä edistää puiden kasvun lisäksi myös hajottajien toimintaa maaperässä (Moilanen ym. 2002, 2012, Saarsalmi ym. 2014).

Säteily- ja vesitase sekä haihtuvat orgaaniset yhdisteet

Kasvihuonekaasujen aiheuttaman maailmanlaajuisen kasvihuoneilmaston lisäksi metsäojituksella on ilmastoon myös muita vaikutuksia, jotka

ovat luonteeltaan paikallisia tai alueellisia.

Märän suon muuttuessa kuivemmaksi metsäksi säteily- ja vesitase muuttuvat (Lohila ym. 2010, Gao ym. 2014). Metsä pidättää auringosta saapuvaa säteilyä erityisesti kevättalvella paremmin kuin avoin suo, koska ojitus vähentää heijastumista eli pienentää albedoa. Kun metsän puiden latvukset ovat jo lumesta paljaat, lumen peittämä suon pinta vielä heijastaa tehokkaasti auringon säteilyä. Tämä albedon pieneneminen on aiheuttanut lumipeitteen sulamisen aikaistumisen muutamalla päivällä ja huhtikuun lämpötilojen nousun (+0,5 °C) Pohjanmaalla, missä metsäojitettujen soiden osuus pinta-alasta on erityisen suuri (Gao ym. 2014). Alueellinen lämmittävä vaikutus on samaa kokoluokkaa kuin puuston hiilinielun kasvamisen maailmanlaajuinen viilentävä vaikutus (Lohila ym. 2010). Kesällä taas lämpötilat jäävät hivenen (−0,1 °C) alhaisemmiksi, koska metsät haihduttavat soita enemmän vettä, mikä kuluttaa energiaa ja siten viilentää ilmakehää (Gao ym. 2014).

Kasvit ja maaperä päästävät ilmakehään haihtuvia orgaanisia yhdisteitä (VOC = volatile organic compounds) (Mäki 2019). Ilmakehässä niistä syntyy aerosolihiukkasia (pieniä, ilmassa leijailevia kiinteitä hiukkasia), jotka edistävät pilvien muodostumista toimimalla vesihöyryn tiivistymisytiminä. Pilvet viilentävät ilmastoa heijastamalla auringonsäteilyä takaisin avaruuteen. Metsien osalta on näyttöä siitä, että haihtuvilla orgaanisilla yhdisteillä on merkittävä vaikutus ilmastoon (Tunved ym. 2006, Teuling ym. 2017). Ojittamattomat suot eroavat metsistä sekä yhdisteiden määrässä että laadussa (Hanson ym. 1999, Hellén ym. 2006, Tiiva ym. 2007, Faubert ym. 2010a, b). Metsäojitettujen soiden VOC-päästöistä ei kuitenkaan ole mittaustietoa, ja ojittamattomien soiden tiedotkin ovat hajanaisia. Jotta metsäojituksen vaikutusta haihtuvien orgaanisten yhdisteiden päästöihin ja sitä kautta ilmastoon voisi arvioida, tarvittaisiin lisää päästömittauksia sekä ilmakehän toiminnan nykyistä parempaa ymmärtämistä.

Metsäojituksen ilmastovaikutus

Ensimmäisenä ojituksen jälkeisenä kiertoaikana metsäojituksella on yleensä ilmastoa viilentävä

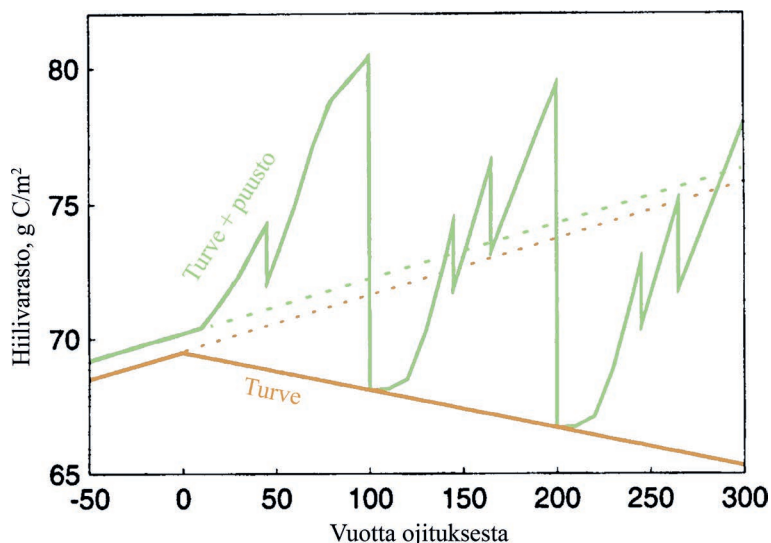
vaikutus, koska vähentynyt metaanipäästö ja kasvavan puuston hiilidioksidinielu viilentävät ilmastoa enemmän kuin turpeen hävikistä johtuvat hiilidioksidi- ja typpioksiduulipäästöt ja albedon pieneneminen lämmittävät (Minkkinen ym. 2001, 2002, Lohila ym. 2010, Ojanen ym. 2013, Hommeltenberg ym. 2014, Uri ym. 2017, Minkkinen ym. 2018). Puustoon sitoutuneesta hiilestä suurin osa kuitenkin vapautuu muutamassa vuodessa päätehakkuun jälkeen hiilidioksidina takaisin ilmakehään (Minkkinen ym. 2002), koska vain pieni osa ainespuusta päätyy pitkäikäisiin puutuotteisiin (Vaahtera ym. 2018). Ojituksesta johtuva turpeen hävikki sen sijaan jää pysyväksi.

Jos turvetta häviää paksu kerros, metsäojituksen vaikutus on pitkällä aikavälillä vääjäämättä ilmastoa lämmittävä (kuva 1). Esimerkiksi eteläsuomalaisen puolukkaturvekankaan puuston biomassassa on pitkällä aikavälillä hiiltä keskimäärin 6–7 kg/m² ja puutuotteissa vain murto-osa tästä (Laine ym. 1996). Sama määrä hiiltä on noin 15 cm kerroksessa luonnontilaisen suon turvetta. Siten puuston hiilivaraston suurentaminen keinoilla, jotka aiheuttavat merkittävää turpeen hävikkiä, on ilmastomuutoksen torjumisen kannalta mielekäästä vain hyvin ohutturpeisilla soilla tai kivennäismaiksi luokitelluilla ojitusalueilla. Niillä kuivatuksen ylläpitoa ja metsätalouden jatkamista kivennäismaiden tapaan voi pitää ilmastomuutoksen hillinnän kannalta hyvänä ja kestäväenä ratkaisuna.

Muutaman vuosikymmenen aikaskaalassa metsäojitetun suon hiilivarastoon vaikuttavat voimakkaasti puuston kasvu ja hakkuut kuten kivennäismaillakin (kuva 1). Niinpä puuston kasvua voimistavilla kunnostusojituksilla tai lannoituksilla tai hakkuista luopumisella voi olla ilmastoa viilentävä vaikutus (Ojanen ym. 2019, Ojanen & Minkkinen 2020). Yleensä puuston kasvua voimistavat keinot kuitenkin edistävät myös turpeen hävikkiä. Pitemmällä aikavälillä turpeen hävikin vähentäminen tai estäminen on ainoa kestävä keino vähentää ilmastoa lämmittäviä vaikutuksia, kuten muillakin ojitetuilla soilla.

Metsäojitetun suon maaperän päästöt voidaan minimoida pitämällä vedenpinta niin korkealla, kuin se puuston kasvatuksen kannalta on mahdollista (ks. Ojanen ym. 2020: kuva 4): Hiilidioksidi- ja typpioksiduulipäästöt ovat sitä pienemmät, mitä

Kuva 1. Esimerkki metsäojituksen ja metsätalouden vaikutuksesta turpeen ja puuston hiilivarastoon, kun ojitus toisaalta muuttaa turpeen kertymisen turpeen hävikiksi ja toisaalta lisää puuston kasvua. Katkoviivat kuvaavat kehitystä ilman ojitusta. Piirretty Lainetta ja Minkistä (1996) mukaillen.



korkeammalla vedenpinta on. Metaanipäästö alkaa kasvaa merkittävästi vasta sellaisissa oloissa, jotka ovat tavanomaisen metsänkasvatuksen kannalta liian märkiä. Koska juuri hiilidioksidipäästö aiheuttaa suurimman osan metsäojitetun suon ilmastoa lämmittävästä vaikutuksesta (Ojanen ym. 2013), sen vähentäminen on keskeistä.

Metsäojitetun suon maaperän kasvihuonekaasupäästöjä voidaan yksinkertaisimmillaan vähentää tekemällä kunnostusojituksia vain silloin, kun se on puuston kasvulle erityisen tärkeää. Ojia ei myöskään pidä kaivaa syvemmiksi kuin on välttämätöntä. Näin vedenpinta pystytään pitämään niin korkealla, kuin se puuston kasvatuksen kannalta on mahdollista.

Ojien lisäksi puuston määrä vaikuttaa voimakkaasti vedenpintaan (Sarkkola ym. 2010). Tiheä puusto haihduttaa runsaasti vettä, ja lisäksi latvus estää osaa sadevedestä pääsemästä maahan. Kun kunnostusojitus laskee vedenpintaa tyypillisesti 5–10 cm (Ahti & Päivänen 1997, Sarkkola ym. 2010), runsas puusto voi pitää vedenpinnan kasvukaudella 20 cm syvemmällä kuin se ilman puustoa olisi (Sarkkola ym. 2013, Korkiakoski ym. 2019). Avohakkuisiin ja tasaikäisrakenteisen metsän kasvatukseen perustuva metsätalous on metsäojitetuilla soilla ilmaston kannalta hankala vaihtoehto. Yhtäältä päätehakkuuta edeltävä runsas puusto pitää vedenpinnan syvällä. Toisaalta

päätehakkuuta seuraava puuton vaihe nostaa vedenpinnan niin korkealle, että tehokas ojitus on tarpeen.

Siirtymällä jatkuvapeitteiseen metsänkasvatukseen voidaan vähentää vedenpinnan syvyyden vaihtelua (Nieminen ym. 2018). Päätehakkuista luopuminen vähentää kunnostusojitusten tarvetta ja toisaalta puusto ei yleensä ole yhtä runsas kuin ennen päätehakkuuta, joten puuston kuivattava vaikutus ei kohoa yhtä suureksi kuin tasaikäisrakenteisessa metsän kasvatuksessa. Jatkuvapeitteisellä metsänkasvatuksella on siten mahdollista vähentää turpeen hävikkiä. Arvioita siitä, kuinka merkittävä ero jatkuvapeitteisellä ja tasaikäisrakenteisella metsänkasvatuksella pitkällä aikavälillä voi olla, ei kuitenkaan ole vielä tehty. Koska jatkuvapeitteisessä metsätaloudessakin suo pysyy ojitettuna, ei voida olettaa, että turpeen hävikkiä pystyttäisiin ainakaan rehevillä kasvupaikoilla kokonaan estämään.

Karuilla kasvupaikoilla (puolukka- ja varpurvekkankaat) turpeen hävikki voitaneen hyvin pitkälti estää pitämällä kuivatus maltillisena. Tämä toteutuu, kun kasvukauden keskimääräinen vedenpinnan taso on enintään 30–40 cm syvyydessä. Näin metsätalous voi parhaassa tapauksessa olla pitkällä aikavälillä ilmastollisesti kestävä. Ravinteikkailla kasvupaikoilla (ruoho- ja mustikkaturvekkankaat) vedenpinnan pitäisi

kuitenkin olla hyvin lähellä maanpintaa (noin 10 cm syvyydessä, Ojanen & Minkkinen 2019), jotta turpeen hävikki loppuisi. Niin märässä tavanomainen metsätalous ei liene mahdollista. Niinpä ojitukseen perustuvan metsätalouden jatkaminen ravinteikkailla kasvupaikoilla väistämättä tarkoittaa turpeen hävikkiä hiilidioksidi- ja typpioksiduulipäästöineen. Suon ennallistamisella rehevien soiden turpeen hävikki saadaan estettyä, mutta metaanipäästöjen kasvamisen takia ennallistamisen vaikutus voi olla ilmastoa lämmittävä joitain vuosikymmeniä, erityisesti märäksi avosuoksi ennallistettaessa (Kareksela ym. 2020, Ojanen & Minkkinen 2020). Metsänkasvatuskelvottomilla, useimmiten karuilla soilla metsätaloudesta luopuminen ja suon jättäminen ennallistumaan itseksensä on ilmaston kannalta kestävä vaihtoehto (Juutinen ym. 2020, Kareksela ym. 2020).

Turvemaan peltojen metsitys sitoo hiiltä puustoon, minkä takia metsitys vähentää päästöjä. Turpeen hävikki on kuitenkin voimakasta maatalouden maaperässä aiheuttamien muutosten seurauksena. Metsitys niin, että samalla hallitusti nostetaan vedenpintaa, voisi samalla kertaa vähentää tehokkaasti turpeen hävikkiä ja sitoa puustoon hiiltä.

Metsäojituksessa on kaksi merkittävää riskiä ilmastomuutoksen edetessä: Jos kuivat kesät yleistyvät (Dai, 2013, Jolly ym. 2015), metsä- ja samalla turvepalojen riski kasvaa suureksi. Turvepalot ovat jo nyt yleisiä Suomea mantereisemmissa, kuivakesäisissä ilmastoissa Venäjällä ja Kanadassa (Turetsky ym. 2004, Sirin ym. 2018). Ilmaston lämpeneminen voi kiihdyttää turpeen hävikkiä myös, koska ilmaston lämpeneminen lämmittää maaperää, ja turpeen hajotus kiihtyy lämpötilan noustessa (Silvola ym. 1996, Mäkiranta ym. 2009, Ojanen ym. 2010). Ilmaston lämpeneminen myös lisää haihduntaa, ja turpeen hävikki on sitä nopeampaa mitä kuivempi suo on (Ojanen & Minkkinen 2019). Turpeen hävikistä aiheutuvat päästöt ovatkin tyypillisesti sitä suuremmat, mitä lämpimämpi ilmasto on (Hiraishi ym. 2014).

Johtopäätökset

Lähivuosikymmenien aikaskaalassa puuston kasvu ja hakkuut vaikuttavat voimakkaasti metsäojitettujen soiden ilmastovaikutukseen samaan

tapaan kuin metsissä yleisestikin. Vuosisatojen aikaskaalassa ilmastollisesti kestävä, ekosysteemin hiilivaraston turvaava ojitukseen perustuva metsätalous on rehevillä, ruoho- ja mustikkaturvekankaiden kasvupaikoilla mahdollista vain hyvin ohutturpeisilla (< 10 cm) ojitusalueilla. Näillä paikoilla puuston hiilivarasto on turpeen hiilivarastoa merkittävämpi.

Karuilla, puolukka- ja varputurvekankaan kasvupaikoilla ojitukseen perustuva metsätalous voi olla ilmastollisesti kestävää myös paksuturpeisilla soilla. Tämä kuitenkin edellyttää, että vedenpinta ei pääse laskemaan kovin syvälle. Ojitus täytyy pitää maltillisena ja puuston kuivattava vaikutus ei saa nousta liian suureksi. Lisäksi riskinä on, että ilmastomuutos nopeuttaa turpeen hävikkiä ja aiheuttaa turvepaloja.

Avain sekä karujen kasvupaikkojen turpeen hävikin estämiseen että rehevien, ruoho- ja mustikkaturvekankaan kasvupaikkojen turpeen hävikin hidastamiseen on kuivatuksen pitäminen mahdollisimman vähäisenä. Tähän voidaan pyrkiä sekä tasaikäisrakenteisessa että jatkuva-peatteisessa metsänkasvatuksessa välttämällä tarpeettoman tehokasta ojitusta ja säätelemällä puuston kuivattavaa vaikutusta.

Rehevilla paksuturpeisilla soilla ojitukseen perustuva, pitkällä aikavälillä ilmastollisesti kestävä metsätalous on tutkimustiedon perusteella mahdotonta. Tällaisilla soilla vähittäinen, hallittu vedenpinnan nosto voisi tarjota taloudellisestikin kannattavan vaihtoehdon. Jo tehtyjen ojitusten ja puuston kuivattavan vaikutuksen avulla metsän kasvatusta ja maltillisia hakkuuta voidaan yleensä jatkaa vuosikymmeniä. Kun suo alkaa olla liian märkä metsänkasvatukselle, taloudellisesti arvokas puusto korjataan ja suo jätetään vettymään. Näin saataisiin metsänomistajille tuloa ja metsäteollisuudelle puuta, samalla kun metsänomistaja säästyisi investoinneilta kunnostusojituksiin ja metsänuudistamiseen. Paksujen turvekerrosten valtava hiilivarasto säilyy, kun suota ei kuivateta nykyistä syvemmälle.

Jos turvemaan peltoja siirtyy metsätalouteen, niiden turpeen hävikin estämiseen pitää kiinnittää huomiota. Jos pellot metsitetään ilman vedenpinnan hallittua nostoa, synnytetään metsiä, joilla on merkittävät hiilidioksidi- ja typpioksiduulipäästöt maaperästä.

Kommentoineet: Sakari Rehell, Pekka Punttila, Juha-Pekka Hotanen, Sakari Sarkkola

Kirjallisuus

- Ahti, E. & Päivänen, J. 1997. Response of stand growth and water table level to maintenance of ditch networks within forest drainage areas. Teoksessa: Trettin, C., Jurgensen, M., Grigal, D., Gale, M. & Jeglum, J. (toim.). Northern Forested Wetlands: Ecology and Management. CRC Press, Lewis Publishers, Boca Raton, Florida, USA. s. 449–457. ISBN 978-1-56670-177-8
- Dai, A. 2013. Increasing drought under global warming in observations and models. *Nature Climate Change* 3: 51–58. Saatavissa: <https://doi.org/10.1038/NCLIMATE1633>
- Ernfors, M., Sikström, U., Nilsson, M., Klemmedtson, L., 2010. Effects of wood ash fertilization on forest floor greenhouse gas emissions and tree growth in nutrient poor drained peatland forests. *Science of the Total Environment* 408: 4580–4590. Saatavissa: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2010.06.024>
- Faubert, P., Tiiva, P., Rinnan, A., Räsänen, J., Holopainen, J. K., Holopainen, T., Kyrö E., & Rinnan, R. 2010a. Non-methane biogenic volatile organic compound emissions from a subarctic peatland under enhanced UV-B radiation. *Ecosystems* 13: 860–873. Saatavissa: <https://doi.org/10.1007/s10021-010-9362-1>
- Faubert, P., Tiiva, P., Rinnan, Å., Rätty, S., Holopainen, J. K., Holopainen, T., & Rinnan, R. 2010b. Effect of vegetation removal and water table drawdown on the nonmethane biogenic volatile organic compound emissions in boreal peatland microcosms. *Atmospheric Environment* 44: 4432–4439. Saatavissa: <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2010.07.039>
- Gao, Y., Markkanen, T., Backman, L., Henttonen, H. M., Pietikäinen, J.-P., Mäkelä, H. M. & Laaksonen, A. Biogeophysical impacts of peatland forestation on regional climate changes in Finland. *Biogeosciences* 11: 7251–7267. <https://doi.org/10.5194/bg-11-7251-2014>
- Hanson, D. T., Swanson, S., Graham, L. E., & Sharkey, T. D. 1999. Evolutionary significance of isoprene emission from mosses. *American Journal of Botany* 86: 634–639. Saatavissa: <https://doi.org/10.2307/2656571>
- Heikkinen, T., Ojanen, P., Minkkinen, K., Penttilä, T., Haapalehto, T. & Tolvanen, A. 2016. Ennallistamisen vaikutus metsänkasvatustietomien soiden metaanivirtoihin. *Suo* 67(1): 22–26. Saatavissa: <http://suo.fi/article/10099>
- Hellén, H., Hakola, H., Pystynen, K.-H., Rinne, J., & Haapanala, S. 2006. C2–C10 hydrocarbon emissions from a boreal wetland and forest floor. *Biogeosciences* 3: 167–174. Saatavissa: <https://doi.org/10.5194/bg-3-167-2006>
- Hiraishi, T., Krug, T., Tanabe, K., Srivastava, N., Baasansuren, J., Fukuda, M. and Troxler, T.G. (toim.) 2014. 2013 Supplement to the 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories: Wetlands. IPCC, Switzerland. Saatavissa: <https://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/wetlands/index.html>
- Hommeltenberg, J., Schmid, H.P., Drösler, M. & Werle, P. 2014. Can a bog drained for forestry be a stronger carbon sink than a natural bog forest? *Biogeosciences* 11: 3477–3493. Saatavissa: <https://doi.org/10.5194/bg-11-3477-2014>
- Huttunen, J., Nykänen, H., Martikainen, P.J. & Nieminen, M. 2003. Fluxes of nitrous oxide and methane from drained peatlands following forest clear-felling in southern Finland. *Plant and Soil* 255: 457–462. Saatavissa: <https://doi.org/10.1023/A:1026035427891>
- Jolly, W.M., Cochrane, M., Freeborn, P., Holden, Z., Brown, T., Williamson, G. & Bowman, D. 2015. Climate-induced variations in global wildfire danger from 1979 to 2013. *Nature Communications* 6: 7537. Saatavissa: <https://doi.org/10.1038/ncomms8537>
- Juutinen, A., Tolvanen, A., Saarimaa, M., Ojanen, P., Sarkkola, S., Ahtikoski, A., Haikarainen, S., Karhu, J., Haara, A., Nieminen, M., Penttilä, T., Nousiainen, H., Hotanen, J.-P., Minkkinen, K., Kurttila, M., Heikkinen, K., Sallantausta, T., Aapala, K. & Tuominen, S. 2020. Cost-effective land-use options of drained peatlands – integrated biophysical-economic modeling approach. *Ecological Economics* 175: 106704. Saatavissa: <https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2020.106704>
- Kareksela, S. 2020 Soiden ennallistamisen vaikutus monimuotoisuuteen, vesistöihin ja ilmastoon. Luontopaneelin raportti. Tekeillä.

- Klemetsson, L., Ernfors, M., Björk, R., Weslien, P., Rütting, T., Grill, P., Sikström, U., 2010. Reduction of greenhouse gas emissions by wood ash application to a *Picea abies* (L.) Karst. forest on a drained organic soil. *European Journal of Soil Science* 61: 734–744. Saatavissa: <https://doi.org/10.1111/j.1365-2389.2010.01279.x>
- Korkiakoski, M., Ojanen, P., Penttilä, T., Minkkinen, K., Sarkkola, S., Rainne, J., Laurila, T. & Lohila, A. 2020. The effect of partial harvest on CH₄ and N₂O balances of a drained boreal peatland forest. *Agricultural and Forest Meteorology* 295: 108168. 15 s. Saatavissa: <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2020.108168>
- Korkiakoski, M., Tuovinen, J-P., Penttilä, T., Sarkkola, S., Ojanen, P., Minkkinen, K., Rainne, J., Laurila, T. & Lohila, A. 2019. Greenhouse gas and energy fluxes in a boreal peatland forest after clearcutting. *Biogeosciences* 16: 3703–3723. <https://doi.org/10.5194/bg-16-3703-2019>
- Laine, J. & Minkkinen, K. 1996. Effect of forest drainage on the carbon balance of a mire: a case study. *Scandinavian Journal of Forest Research* 11: 307–312. Saatavissa: <https://doi.org/10.1080/02827589609382940>
- Laine, J., Minkkinen, K., Sinisalo, J., Savolainen, I. & Martikainen, P.J. 1996. Greenhouse impact of a mire after drainage for forestry. Teoksessa: Trettin, C., Gale, M., Jurgensen, M. & Jeglum J. (toim.). *Ecology and Management: Forested Wetlands*. Lewis Publishers, Chelsea, Michigan. s. 437–447.
- Lankinen-Timonen 2019. Harvennushakkuun ja kunnostusojituksen vaikutus metsäojitetun suon hiilidioksidivuohon. Pro gradu -tutkielma. Helsingin yliopisto, metsätieteiden osasto. 60 s. Saatavissa: <http://urn.fi/URN:NBN:fi:hulib-201905081895>
- Lohila, A., Laurila, T., Aro, L., Aurela, M., Tuovinen, J-P., Laine, J., Kolari, P. & Minkkinen, K. 2007. Carbon dioxide exchange above a 30-year-old Scots pine plantation established on organic-soil cropland. *Boreal Environment Research* 12: 141–157. Saatavissa: <https://www.borenv.net>
- Lohila, A., Minkkinen, K., Laine, J., Savolainen, I., Tuovinen, J-P., Korhonen, L., Laurila, T., Tietäväinen, H. & Laaksonen, A. 2010. Forestation of boreal peatlands: Impacts of changing albedo and greenhouse gas fluxes on radiative forcing. *Journal of Geophysical Research* 115: G04011. Saatavissa: <https://doi.org/10.1029/2010JG001327>
- Maljanen, M., Hytönen, J. & Martikainen, P.J. 2001. Fluxes of N₂O, CH₄ and CO₂ on afforested boreal agricultural soils. *Plant and Soil* 231: 113–121. Saatavissa: <https://doi.org/10.1023/A:1010372914805>
- Maljanen, M., Jokinen, H., Saari, A., Strömmer, R., Martikainen, P.J., 2006. Methane and nitrous oxide fluxes, and carbon dioxide production in boreal forest soil fertilized with wood ash and nitrogen. *Soil Use and Management* 22: 151–157. Saatavissa: <https://doi.org/10.1111/j.1475-2743.2006.00029.x>
- Maljanen, M., Liimatainen, M., Hytönen, J., Martikainen, P.J., 2014. The effect of granulated wood-ash fertilization on soil properties and greenhouse gas (GHG) emissions in boreal peatland forests. *Boreal Environment Research* 19: 295–309. Saatavissa: <http://www.borenv.net>
- Maljanen, M., Shurpali, N., Hytönen, J., Mäkiranta, P., Aro, L., Potila, H., Laine, J., Li, C. & Martikainen, P.J. 2012. Afforestation does not necessarily reduce nitrous oxide emissions from managed boreal peat soils. *Biogeochemistry* 108: 199–218. Saatavissa: <https://doi.org/10.1007/s10533-011-9591-1>
- Minkkinen, K., Korhonen, R., Savolainen, I. & Laine, J. 2002. Carbon balance and radiative forcing of Finnish peatlands 1990–2100 – the impact of forestry drainage. *Global Change Biology* 8: 785–799. Saatavissa: <https://doi.org/10.1046/j.1365-2486.2002.00504.x>
- Minkkinen, K. & Laine, J. 1998. Long-term effect of forest drainage on the peat carbon stores of pine mires in Finland. *Canadian Journal of Forest research* 28: 1267–1275. Saatavissa: <https://doi.org/10.1139/x98-104>
- Minkkinen, K., Laine, J. & Hökkä, H. 2001. Tree stand development and carbon Ssequestration in drained peatland stands in Finland – a simulation study. *Silva Fennica* 35(1): 55–69. Saatavissa: <https://doi.org/10.14214/sf.603>
- Minkkinen, K., Ojanen, P., Koskinen, M. & Penttilä, T. 2020 Nitrous oxide emissions of undrained, forestry-drained, and rewetted boreal peatlands. *Forest Ecology and Management* 478: 118494. 10 s. Saatavissa: <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2020.118494>

- Minkkinen, K., Ojanen, P., Penttilä, T., Aurela, M., Laurila, T., Tuovinen, J-P. & Lohila, A. 2018. Persistent carbon sink at a boreal drained bog forest. *Biogeosciences* 15: 3603–3624. Saatavissa: <https://doi.org/10.5194/bg-15-3603-2018>
- Moilanen, M., Hytönen, J., Leppälä, M., 2012. Application of wood ash accelerates soil respiration and tree growth on drained peatland. *European Journal of Soil Science* 63: 467–475. Saatavissa: <https://doi.org/10.1111/j.1365-2389.2012.01467.x>
- Moilanen, M., Silfverberg, K., Hokkanen, T., 2002. Effects of wood-ash on the tree growth, vegetation and substrate quality of a drained mire: a case study. *Forest Ecology and Management* 171: 321–338. Saatavissa: [https://doi.org/10.1016/S0378-1127\(01\)00789-7](https://doi.org/10.1016/S0378-1127(01)00789-7)
- Mäki, M. 2019. Volatile organic compound fluxes from northern forest soils. Väitöskirja. *Dissertationes Forestales* 275: 1–52. Saatavissa: <https://doi.org/10.14214/df.275>
- Mäkiranta, P. 2003. Hakkuiden vaikutus metsäojitetun suon maahengitykseen. Pro gradu. Helsingin yliopisto.
- Mäkiranta, P., Hytönen, J., Aro, L., Maljanen, M., Pihlatie, M., Potila, H., Shurpali, N., Laine, J., Lohila, A., Martikainen, P.J. & Minkkinen, K. 2007. Soil greenhouse gas emissions from afforested organic soil croplands and cutaway peatlands. *Boreal Environment Research* 12: 159–175. Saatavissa: <https://www.borenv.net>
- Mäkiranta, P., Laiho, R., Fritze, H., Hytönen, J., Laine, J. & Minkkinen, K. 2009. Indirect regulation of heterotrophic peat soil respiration by water level via microbial community structure and temperature sensitivity. *Soil Biology & Biochemistry* 41: 695–703. Saatavissa: <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2009.01.004>
- Mäkiranta, P., Laiho, R., Penttilä, T. & Minkkinen, K. 2012. The impact of logging residue on soil GHG fluxes in a drained peatland forest. *Soil Biology & Biochemistry* 48: 1–9. Saatavissa: <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2012.01.005>
- Mäkiranta, P., Minkkinen, K., Hytönen, J. & Laine, J. 2008. Factors causing temporal and spatial variation in heterotrophic and rhizospheric components of soil respiration in afforested organic soil croplands in Finland. *Soil Biology & Biochemistry* 40(7): 1592–1600. Saatavissa: <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2008.01.009>
- Mäkiranta, P., Riutta, T., Penttilä, T. & Minkkinen, K. 2010. Dynamics of net ecosystem CO₂ exchange and heterotrophic soil respiration following clearfelling in a drained peatland forest. *Agricultural and Forest Meteorology* 150: 1585–1596. Saatavissa: <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2010.08.010>
- Nieminen, M., Hökkä, H., Laiho, R., Juutinen, A., Ahtikoski, A., Pearson, M., Kojola, S., Sarkkola, S., Launiainen, S., Valkonen, S., Penttilä, T., Lohila, A., Saarinen, M., Haahti, K., Mäkipää, R., Miettinen, J. & Ollikainen, M. 2018. Could continuous cover forestry be an economically and environmentally feasible management option on drained boreal peatlands? *Forest Ecology and Management* 424: 78–84. Saatavissa: <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2018.04.046>
- Ojanen, P. & Minkkinen, K. 2020. Rewetting offers rapid climate benefits for tropical and agricultural peatlands but not for forestry-drained peatlands. *Global Biogeochemical Cycles* 34(7). 16 s. Saatavissa: <https://doi.org/10.1029/2019GB006503>
- Ojanen, P. & Minkkinen, K. 2019. The dependence of net soil CO₂ emissions on water table depth in boreal peatlands drained for forestry. *Mires and Peat* 24(27): 1–8. Saatavissa: <https://doi.org/10.19189/Map.2019.OMB.StA.1751>
- Ojanen, P., Minkkinen, K., Alm, J., Penttilä, T., 2010. Soil–atmosphere CO₂, CH₄ and N₂O fluxes in boreal forestry-drained peatlands. *For. Ecol. Manage.* 260, 411–421. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2010.04.036>
- Ojanen, P., Minkkinen, K., Penttilä, T. 2013. The current greenhouse gas impact of forestry-drained boreal peatlands. *Forest Ecology and Management* 289: 201–208. Saatavissa: <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2012.10.008>
- Ojanen, P., Mäkiranta, K., Penttilä, T. & Minkkinen, K. 2017. Do logging residue piles trigger extra decomposition of soil organic matter? *Forest Ecology and Management* 405: 367–380. Saatavissa: <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2017.09.055>
- Ojanen, P., Penttilä, T., Tolvanen, A., Hotanen, J-P., Saarimaa, M., Nousiainen, H. & Minkkinen, K. 2019. Long-term effect of fertilization on the greenhouse gas exchange of low-productive peatland forests. *Forest Ecology and Management* 432: 786–798. Saatavissa: <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2019.05.055>

- org/10.1016/j.foreco.2018.10.015
- Pearson, M., Saarinen, M., Minkkinen, K., Silvan, N. & Laine, J. 2012. Short-term impacts of soil preparation on greenhouse gas fluxes: A case study in nutrient-poor, clearcut peatland forest. *Forest Ecology and Management* 283: 10–26. Saatavissa: <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2012.07.011>
- Pihlatie, M., Rinne, J., Lohila, A., Laurila, T., Aro, L. & Vesala, T. 2004. Nitrous oxide emissions from an afforested peat field using eddy covariance and enclosure techniques. Teoksessa: Päivänen, J. (toim.): Proceedings of the 12th International Peat Congress. Volume 2. International Peat Society. s. 1010–1014.
- Rütting, T., Björk, R., Meyer, A., Klemetsson, L., Sikström, U. 2014. Reduced global warming potential after wood ash application in drained Northern peatland forests. *Forest Ecology and Management* 328: 159–166. Saatavissa: <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2014.05.033>
- Saari, P., Saarnio, S., Kukkonen, J., Akkanen, J., Heinonen, J., Saari, V. & Alm, J. 2009. DOC and N₂O dynamics in upland and peatland forest soils after clear-cutting and soil preparation. *Biogeochemistry* 94: 217–231. Saatavissa: <https://doi.org/10.1007/s10533-009-9320-1>
- Saarsalmi, A., Smolander, A., Moilanen, M., Kukkola, M. 2014. Wood ash in boreal, lowproductive pine stands on upland and peatland sites: long-term effects on stand growth and soil properties. *Forest Ecology and Management* 327: 86–95. Saatavissa: <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2014.04.031>
- Sarkkola, S., Hökkä, H., Koivusalo, H., Nieminen, M., Ahti, E., Päivänen, J. & Laine, J. 2010. Role of tree stand evapotranspiration in maintaining satisfactory drainage conditions in drained peatlands. *Canadian Journal of Forest Research* 40: 1485–1496. Saatavissa: <https://doi.org/10.1139/X10-084>
- Sarkkola, S., Nieminen, M., Koivusalo, H., Laurén, A., Ahti, E., Launiainen, S., Nikinmaa, E., Marttila, H., Laine, J. & Hökkä, H. 2013. Domination of growing-season evapotranspiration over runoff makes ditch network maintenance in mature peatland forests questionable. *Mires and Peat* 11: 2. Saatavissa: <http://mires-and-peat.net/pages/volumes/map11/map1102.php>
- Silvola, J., Alm, J., Ahlholm, U., Nykänen, H. & Martikainen, P. 1996. CO₂ fluxes from peat in boreal mires under varying temperature and moisture conditions. *Journal of Ecology* 84: 192–228. Saatavissa: <https://www.jstor.org/stable/2261357>
- Sirin, S., Medvedeva, M., Maslov, A. & Vozbrannaya, A. 2018. Assessing the land and vegetation cover of abandoned fire hazardous and rewetted peatlands: comparing different multispectral satellite data. *Land* 7(2): 71. Saatavissa: <https://doi.org/10.3390/land7020071>
- Teuling, A., Taylor, C., Meriink, J., Melsen, L., Miralles, D., Heerwaarden, C., Vautard, R., Stegehuis, A., Nabuurs, G-J. & Vilà-Guerau de Arellano, J. 2017. Observational evidence for cloud cover enhancement over western European forests. *Nature Communications* 8: 14065. <https://doi.org/10.1038/ncomms14065>
- Tiiva P., Rinnan R., Faubert P., Räsänen J., Holopainen T., Kyrö E. & Holopainen J.K. 2007. Isoprene emission from a subarctic peatland under enhanced UV-B radiation. *New Phytologist* 176: 346–355. Saatavissa: <https://doi.org/10.1111/j.1469-8137.2007.02164.x>
- Tunved, P., Hansson, H-C., Kerminen, V-M., Ström, J., Dal Maso, M., Lihavainen, H., Viisanen, Y., Aalto, P., Komppula, M. & Kulmala, M. 2006. High Natural Aerosol Loading over Boreal Forests. *Science* 312: 261–263. <https://doi.org/10.1126/science.1123052>
- Turetsky, M., Amiro, B., Bosch, E. & Bhatti, J. 2004. Historical burn area in western Canadian peatlands and its relationship to fire weather indices. *Global Biogeochemical Cycles* 18: GB4014. Saatavissa: <https://doi.org/10.1029/2004GB002222>
- Uri, V., Kukumägi, M., Aosaar, J., Varik, M., Becker, H., Morozov, G. & Karoles, K. 2017. 684 Ecosystems carbon budgets of differently aged downy birch stands growing on well-drained 685 peatlands. *Forest Ecology and Management* 399: 82–93. Saatavissa: <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2017.05.023>
- Vaahtera, E., Aarne, M., Ihalainen, A., Mäki-Simola, E., Peltola, A., Torvelainen, J., Uotila, E. & Ylitalo, E. 2018. Suomen metsätilastot. Luonnonvarakeskus. Saatavissa: <http://urn.fi/URN:NBN:fi-fe201902043966>